

메이서(Maser)와 레이서(Laser)

技術解説
19~1~1

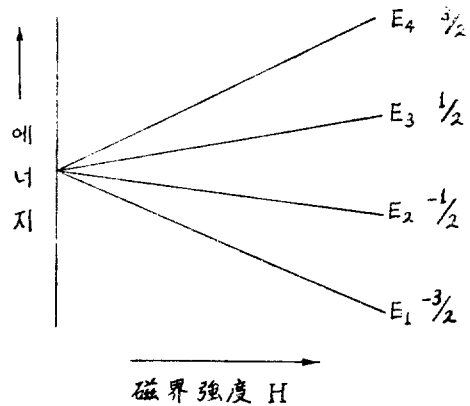
趙 (Chul) 哲* (Cho)

固狀機器

메이서나 레이서 材料로 가장 많이 使用되는 것은 固狀材料이고 이들 材料中에서 여기서는 主로 루비(ruby)를 그 活性材料로 使用하는 경우와 半導體레이서에 對하여 相反한다.

루비 메이서(Ruby Maser)

루비 메이서는 反轉分布狀態를 얻는 機構에서 氣狀機器와는 달리 電子常磁共振(electron paramagnetic resonance, epr)이라는 現象을 利用하고 있다. 루비는 酸化알루미늄을 그 主成分으로 하고 그 알루미늄의 極히 少量이 크로뮴原子와 置換된 化學成分을 갖고있는 構造部 Al_2O_3 內에 微量의 Cr^{+++} 가 Al原子와 置換된 構造로 成 있다. 크로뮴原子는 6개의 外殼電子를 갖고 있으나 이中 3개가 酸化알루미늄과의 結合에 使用되고 나머지 3개는 結合에 使用되지 않고 있는 即 比較的의 自由로운 狀態에 놓이고 있다. 이 Cr^{+++} 가 epr 現象을 나타낸다. 다음 表는 이 結合에 關與하지 않는 3개의 電子의 可能的 組合과 그 結果 나타나는 原子의 에너지準位를 表示한것이다. 이 表에 나타난 에너지量子化는 다음과 같이 그림으로 表示할 수 있다.



에너지準位가 變하게된다. 例를 들면 表에서 萬一 電子 2가 印加된 人力信號에 依해서 $-1/2$ 에서 $1/2$ 로 變했다면 原子의 에너지狀態는 $1/2$ 에서 $3/2$ 로 變하게된다.

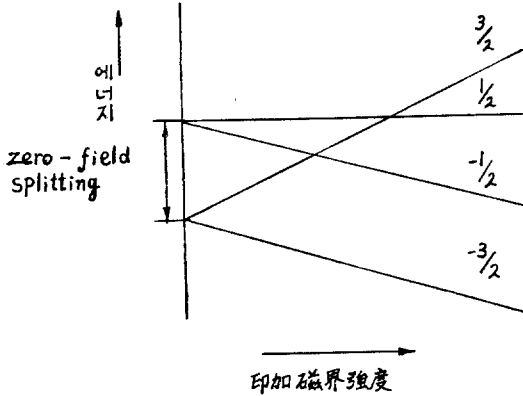
이와 같은 epr 現象을 利用하여 反轉分布狀態를 얻는 法에는 다음과 같은 것들이 있는데 그 하나는 印加磁界의 急變에 依한 것이다. 이는 印加磁界를 電子의 界에 對한 應動速度보다 더 빨리 變化시키면 電子 spin의 方向이 界方向과 反對가 되니 따라서 反轉分布狀態가 超來하게 되는데 이 때 問題가 되는 것은 switching의 速度이다. 다음 180° pulse 法은 마이크로波 pulse를 印加하는 것인데 이렇게 하면 電子가 한 方向에서 다른 方向으로 配列하게 되고 이 때 마이크로波의 에너지는 勿論 印加된 磁界에 對應하는 準位差와 같은 값을 갖고 있어야 한다. 이 以外에도 다른 方法이 있는데 이는 類似한 方法이니 略하기로 하고, 이와 같이 해서 反轉分布狀態를 얻었다고 해도 3準位메이서 作用을 얻을 수 없다. 前記에너지圖를 參考로 살펴보면 遷移律은 E_1 과 E_2 , E_2 와 E_3 , E_3 와 E_4 사이의 遷移만 許容하고 있고 $E_1 \sim E_3$, $E_2 \sim E_4$ 等間의 遷移는 許容하고 있지 않다. 그런데 3準位메이서가 이뤄지기 爲해서는 前者뿐만 아니라 後者間의 遷移도 共存해야 하고 이와 같은 現象이 일어나기

電子 1	電子 2	電子 3	和	
1/2	1/2	1/2	3/2	結果的으로 利用할 수 있는 에너지準位는 $S=3/2, 1/2, -1/2, -3/2$
1/2	1/2	-1/2	1/2	
1/2	-1/2	1/2	1/2	
1/2	-1/2	-1/2	-1/2	
-1/2	1/2	1/2	1/2	
-1/2	1/2	-1/2	-1/2	
-1/2	-1/2	1/2	-1/2	
-1/2	-1/2	-1/2	-3/2	

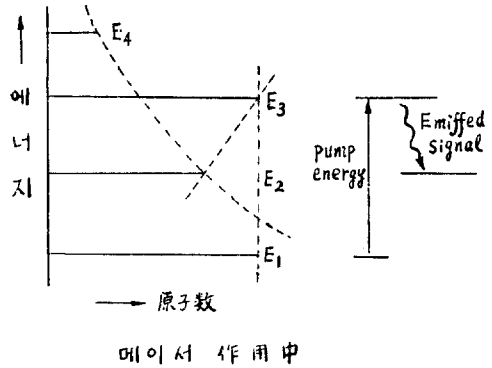
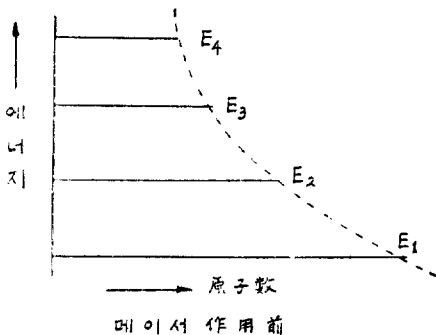
外部印加磁界가 커지면 準位間의 에너지差가 커지며 또 適當한 마이크로波信號를 印加하면 spin의 方向을 바꿀 수 있는데 이것이 epr 現象이고 이에 따라 原子의

* 正會員: 서울工大 電氣科 助教授

爲해서는 零界分割(zero-field splitting)이라는 效果가 또 있어야 한다. 루비의 경우 크로뮴原子에 作用하는 酸化알미늄의 結晶電界에 의한 영향이 이것이고 이 電界는 크로뮴의 電子軌道와 강한 相互作用을 한다. 이 結果 例를 들면 結晶軸方向으로 直流磁界를 印加했을때의 루비內의 Cr^{3+} 이온의 에너지準位는 前記한 에너지準位와 다른 다음과 같은 그림으로 나타난다.



이 그림을 보면 外部印加磁界가 없어도 이미 에너지準位가 分割되 있고 또 이 分割은 $\pm 1/2$ 과 $\pm 3/2$ 이 各各한 雙을 이루고 있음으로 適當한 磁界強度下에서 보편 遷移律에 符合되는 3準位메이서 作用을 일으킬 수 있는 反轉分布狀態를 얻을 수 있음을 알 수 있다. 그러면 特定된 磁界強度下에서의 에너지分布圖는 다음과 같이 된 明白한 일이다. 이 그림에서는 메이서作用이 E_1 , E_2 , E_3 사이에서 이루어지는데 pumping microwave 信號가 루비에 印加되면 180° pulse 法이라든가 혹은 다른 方法에 의하여 電子의 에너지 即 原子의 에너지가 E_1 에서 E_3 狀態로 勵起되고 이 勵起過程은 平衡狀態 即 E_1 과 E_3

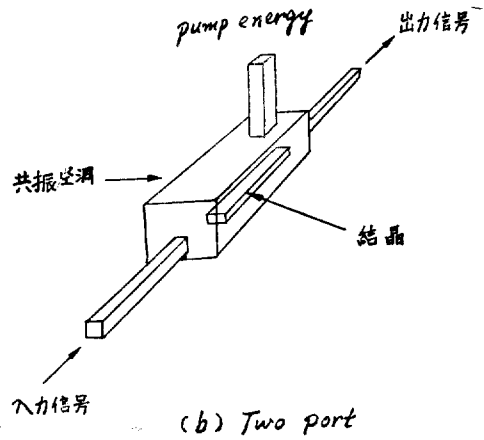
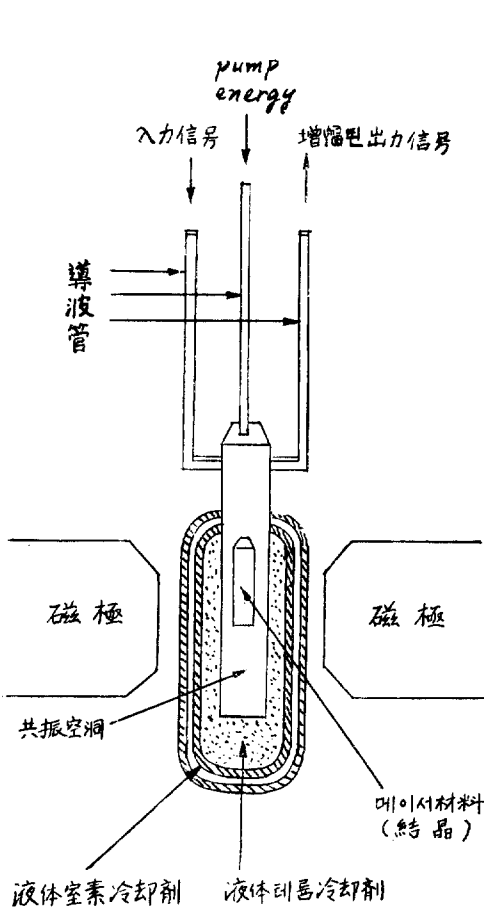


이 있는 原子數가 同一할 때까지 持續되고 이런 狀態에 到達하면 E_3 에 있는 原子數가 E_2 의 그것보다 많아져 이에 反轉分布狀態가 얻어져 이에 E_2 와 E_3 사이의 에너지 差에 該當하는 外部마이크로波信號를 印加해 주면 增幅이 일어나게 된다. 이때 外部印加磁界強度에 따라 에너지準位間의 에너지差가 決定되니까 磁界強度를 變化시키면 動作周波數를 變化시킬 수 있다.

3準位메이서에 使用되는 루비는 動作中 普通 約 $4^\circ K$ 로 冷却하는데 그 理由는 低溫일수록 크로뮴原子가 더 오랫동안 勵起狀態에 머물러 外部信號의 刺戟을 받아 增幅光子를 放射할 機會가 많아지고 또 低溫일수록 基底狀態(E_1)에 原子數가 많아 pumping 할 原子가 많아지기 때문이다. 現在 많이 使用되고 있는 電子增幅器에서 나오는 騷音의 原因은 加熱된 陰極에서 나오는 電子의 흐름을 使用하고 있기 때문에 이에 따르는 電子의 不規則放射에 따르는 shot 騷音(shot noise)가 그 하나인데 이와같은 騷音은 이 메이서에서는 볼 수 없고 이 메이서에서 볼 수 있는 騷音의 主原因은 루비의 自然放射에 따르는 것과 空洞周圍溫度에 따르는 熱騷音이다.

다음 그림은 메이서의 主要部分을 簡略하게 그린 것이다. 메이서作用이 이루어지는 루비는 液體헬륨槽內에서 約 $4^\circ K$ 로 冷却되고 있는 空洞內에 놓여있고 이 全體가 必要한 強磁界를 얻기 爲한 강한 磁極 사이에 놓여 있다. Pump 信號와 增幅한 信號는 導波管을 통해 空洞과 連結되어 있다.

이 그림에 表示된 것과 같은 空洞을 Two-port 또는 Transmission 型이라고 부르며 다음그림(a)에 表示된 것과 같은 것을 One-port 型이라고 부르며 이에는 circulator 와는 裝置가 附隨되어 波를 選別 引導하게 된다. 勿論 이 共振空洞의 寸數는 使用되는 마이크로波의 振動數에 依하여 決定된다. 먼저 言反한 것과 같이 이 空洞의 主機能의 하나는 pump 및 信號周波數



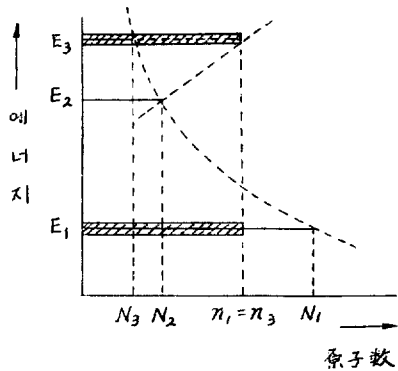
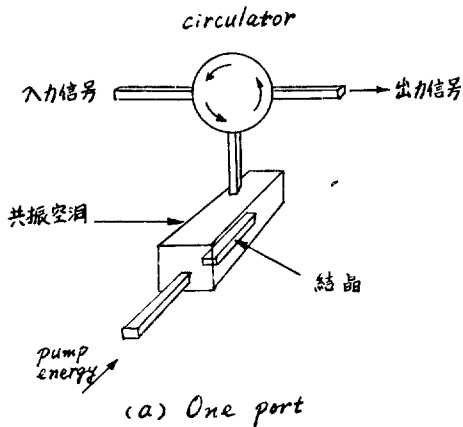
를 갖는 電磁波와 루비結晶幅의 原子와의 相互作用時間을 增加시키는데에 있다.

共振空洞의 設計製作이 끝나면 루비를 알맞게 잘라서 이속에 넣고 또 이 空洞壁에 구멍을 뚫어 導波管과 連結시키는데 이것이 그림 (b)에 表示되어 있다.

冷却法은 먼저나온 그림에서 알 수 있는 것과 같이 液體헬륨과 液體窒素를 使用하는데 이 경우 液體헬륨을 取扱하기가 困難한 點等이 있어 다른 冷却法을 使用하기도 한다.

또 이 메이서作用에 必要한 磁界強度는 매우 크기 때문에 매우 강한 磁石이 所要되는데 이는 超導體의 超導電現象을 利用하여 解決하고 있고 이 때 또 역시 0°K 주위의 온도가 必要하니 液體헬륨이 使用되나 역시 다른 冷却法도 강구되고 있다.

다음 그림과 같은 에너지準位圖를 갖는 3準位메이서의



出力은

$$P = (n_3 - n_2) h \nu_{32} W_{32}$$

로表示되고 여기서 n_2, n_3 는 메이서作用中の 原子數, $h\nu_{32}$ 는 準位 2와 3 사이의 에너지差, W_{32} 는 遷移確率이다. 人力信號가 올 때, maximum power output P_m 는

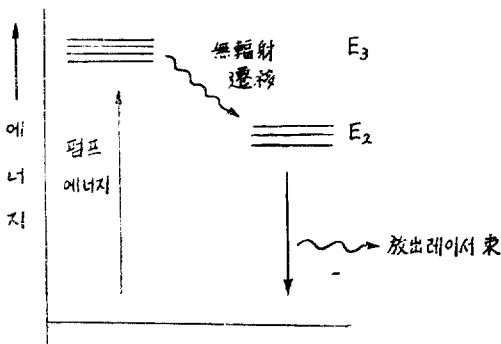
$$P_m = \frac{N h^2 \nu_{32}}{3 k T} (W_{21} \nu_{21} - W_{32} \nu_{32})$$

로表示된다. 여기서 W 's는 格子의 熱振動的 結果 일어나는 spin의 遷移確率이다.

루비 레이저

루비 레이저는 루비 메이서에서와 같은 同一한 材料 루비를 使用하고 있으나 그 動作原理는 매우 다르다. 이 레이저에서 勵起原子를 얻는 때는 電子殼 乃至 準殼 사이의 에너지準位가 문제가 된다.

루비 레이저에 사용되는 루비는 圓柱型이고 이것이 螺旋狀 photo-flash lamp에 감싸여져 있고 이 lamp에서 나오는 輻射가 pump에너지가 된다. 普通 크로뮴原子는 基底狀態에 있는데 flash lamp로부터 光子를 받으면 크로뮴의 軌道電子는 高에너지狀態로 pumping된다. (다음 그림 參照) 이 狀態가 그림에서의 E_3 狀態이고 서로 매우 近接한 에너지帶를 이루고 있다. 勿論 flash lamp에서 나오는 光子들은 여러가지 서로 다른 에너지를 갖는 것들로 構成되고 있으나 이 中 pumping作用에 關與하는 것은 特定한 것들 만이다.



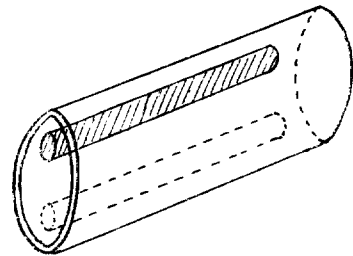
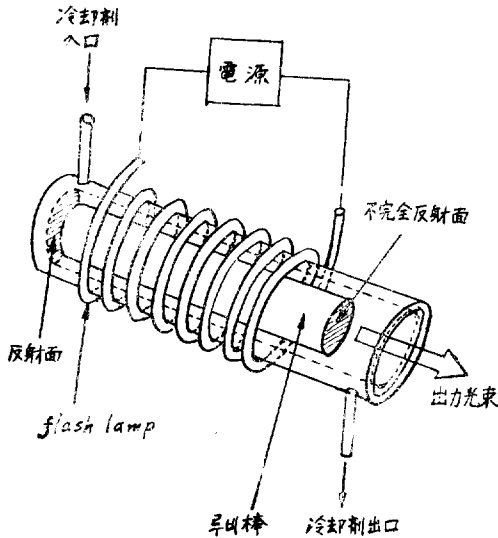
루비 레이저의 에너지 準位圖

吸收된 大部分의 에너지는 매우 짧은 時間內에 準位에 傳達되고 이때 可視輻射가 일어나는 것이 아니라 에너지는 熱의 形態로 結晶格子에 傳達된다. 이 E_2 狀態는 準安定狀態이기 때문에 이 E_2 狀態에 原子들이 많

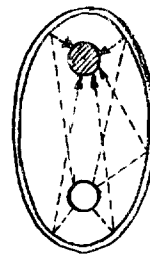
이 모일 수 있고 따라서 基底狀態에 對하여 反轉分布狀態를 超來게 할 수 있다. 이 勵起電子가 그 에너지를 光子의 形態로 放出하면 普通 우리가 볼 수 있는 그런 빛을 發하게 되고 이와 같은 電磁에너지는 인코히런트이다. 루비 레이저에서는 一部分의 勵起된 크로뮴原子는 赤色光을 發하면서 正常에너지狀態로 되돌아 가는데 이는 普通의 螢光過程에 지나지 않는다. 레이저光束은 不規則한 自然輻射에 依하여 基底狀態로 되돌아 가는 上記 勵起電子 以外の 나머지 勵起電子들을 制御할 것 같으면 얻을 수 있다. 이 制御過程은 共振空腔(이를 optical cavity라고도 부른다)이 擔當하게 된다. 이 空腔의 役割은 루비棒이 直接 擔當한다. 卽 루비棒의 兩端은 光子가 이 端에 衝突했을 때 反射하여 도로 루비棒 內部로 되돌아 갈 수 있겠끔 反射性을 띄게하고 있고 이때 兩端面中的 한端面은 어느 程度 光子에 對하여 透過性을 갖게 하고 있어 萬一 光束이 充分한 크기의 強度를 가지게 되면 이 端面을 超過할 수 있겠끔 되었다. 그러면 萬一 루비棒의 軸에 平行한 方向으로 光子가 自然放射에 依하여 勵起原子로부터 放出되었다면 이는 루비의 兩端面에서 反射되기 때문에 이 루비棒속에 갇히게 되고 또 이 속을 왕복하는 사이에 다른 크로뮴 勵起原子들에 衝動을 주어 또 光子를 放출케 하고 하여 이와 같은 連鎖作用이 크로뮴勵起原子 全部가 다 에너지를 放출할 때까지 繼續되고, 이러한 사이에 光束은 若干 透明한 端을 通過하는 데 充分할 만큼의 強度를 가지게 되어 이 端을 通過해 나가고 이때 이 레이저束은 이미 그 共振過程 때문에 코히런트한 性質을 띄고 있게 된다. 이와 같이 루비 레이저의 可能性은 이 optical cavity가 갖는 feedback性에 起原하고 있다. 이 點이 入力信號를 衝動子로 使用하고 있는 루비 메이서作用과 다른 點이다.

圓柱型루비棒의 크기는 길이가 3~10cm, 直徑이 約 1/2cm이며 크로뮴의 含有量은 約 0.05% 程度이고 勿論 레이저作用에 關與하는 것은 이 크로뮴이다. 그림에 表示된 있는 것과 마찬가지로 한 端面은 完全反射材料로 被覆되고 他端은 不完全反射材料로 피복되어 있어 이 두 거울이 루비棒 自體를 共振空腔으로 動作 하게끔 단들고 있다. 軸方向 아닌 다른 方向으로 움직이는 光子는 側面을 通해 밖으로 離脫해 나가고 또 코히런트한 性質을 레이저束에 주기 爲해 兩端面은 完全한 平面이고 서로가 平行이 되 있다.

Flash lamp는 크로뮴原子를 勵起시키기 爲한 에너지源이고 또 이는 여러가지 周波數의 에너지를 放射하나 이 中에서 한周波數만이 이 原子를 勵起시키는 데 關與하게 된다. Flash lamp에서 나오는 빛의 光度가 어떤 臨界光度에 이르기까지는 單只 普通의 螢光現象 卽



(A) 円筒



(B) 反射

楕円反射鏡

루비인 경우 綠色光을 吸收하여 赤色光을 放出하는 現象만이 일어나는데 이 臨界光度를 넘게되면 비로서 레이저作用이 일어나게 된다. 即 이때에는 反轉分布狀態를 超來할 만큼 充分한 에너지가 공급되기 때문이다. 以後 처음 몇개의 原子에서 放出된 赤色光이 既述한 바와 같이 루비棒 속에 갇히게 되고 그後 連鎖作用이 일어나게 된다.

여기서 한가지 알 수 있는 것은 反轉分布狀態를 가져오기 爲해서는 flash lamp에서 나오는 에너지량이 매우 커야한다는 것이다. 그런데 前記 그림의 螺旋狀 lamp인 경우 大部分의 빛은 밖으로 나가버려 루비棒에 吸收되지 않는다. 따라서 이와 같은 非效率性을 改善한 例가 다음 그림과 같은 橢圓反射鏡을 사용한 경우이다.

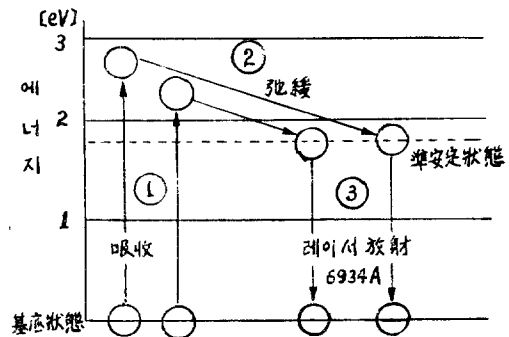
Lamp의 에너지源은 充電된 蓄電器의 放電을 利用하고 充電電壓은 2,000~4,000 volts이다. 따라서 lamp의 動作은 連續的이 아니며 이에 따라 이 경우 레이저의 動作도 連續的이 아니다.

메이서나 레이저의 特性을 더 좋게 하기 爲해서 冷却한다는 것은 이미 言反했는데 特히 이 flash lamp를 사용하는 경우 많은 熱量이 flash lamp로부터 루비棒에 傳達되어 루비結晶을 상하게 할 우려가 있음으로 이 多量의 熱을 除去하기 위하여 루비棒은 보통 77°K의 液體窒素層內에 넣고 있다.

最初 Maiman이 만든 루비 레이저가 放出한 에너지의 波長은 室溫에서 6343Å, 77°K에서 6934Å 이었고 이는 연분홍색에 해당한다. 크로뮴原子的 濃度가 많다면 7009Å, 7041Å의 波長도 나오며 이는 赤色에

해당하고 루비이외의 材料를 使用하는 경우 25900 즉 Å 赤外線分의 波長까지도 얻는다.

다음 그림은 루비 레이저의 에너지 準位圖이다. 波長 6934Å 으로부터 各光子의 能量을 算出할 수 있고 이



로부터 에너지準位圖를 使用하여 이 루비 레이저의 作用을 說明할 수 있다. 即

$$\lambda = c/f$$

$$= 6934 \text{ \AA} \cdot \frac{10^{-10} \text{ meters}}{1 \text{ \AA}} = \frac{3 \cdot 10^8 \text{ meters/sec}}{f}$$

$$f = 4.33 \cdot 10^{14} \text{ hertz}$$

이것이 이 레이저信號의 周波數이니까 이信號를 構成하고 있는 各光子의 에너지는

$$E=hf$$

$$=6,626 \cdot 10^{-34} \text{joule sec} \cdot \frac{1eV}{1.6 \cdot 10^{-19} \text{joules}}$$

$$\cdot 4.33 \cdot 10^{14} \text{hertz}$$

$$=1.8eV$$

그림의 에너지準位圖를 사용하여 루비 메이저의 作用을 解明하면 다음과 같다.

第1段階: flash lamp로부터 綠色光에 해당하는 周波數를 갖는 2~3eV의 에너지를 크로뮴原子가 吸收하여 이 原子가 勵起된다.

第2段階: 勵起된 크로뮴原子는 直接 基底狀態로 되돌아가 레이저作用에 기여하지 않든가 혹은 準安定準位로 넘어간다. 이 準安定準位는 基底狀態로부터 1.8eV의 位置에 있다.

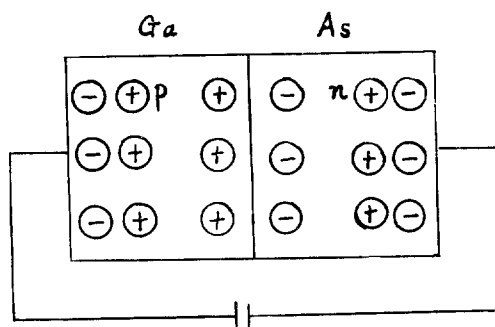
第3段階: 準安定準位로부터 原子들은 衝動乃至 刺戟을 받아 基底狀態로 돌아간다. 이 때 放出되는 光子即信號의 波長은 1.8eV에 該當하는 6934Å이다.

루비 레이저의 全體效率는 다른 電氣機器에 比하여 그다지 良好하지 못하며 펄스루비레이저(pulsed ruby laser)의 pulse 존속時間은 1 millisecond 程度이고 이 pulse의 spike의 peak는 20,000~30,000 watts이다. 이 펄스루비레이저에서 Kerr cell라고 부르는 光學 shutter를 使用하여 pulsation을 制御하여 에너지를 매우 짧은 時間內에 集中시키면 500,000 watts 程度의 total peak-power output intensity를 얻을 수 있다. 이와 같은 制御法을 Q-spoiling라고도 부른다.

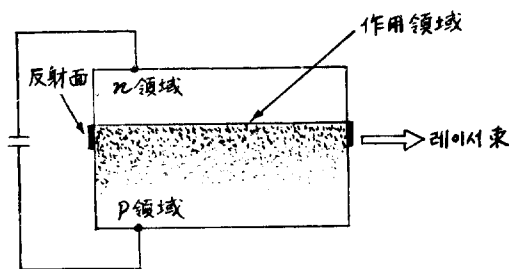
Semiconductor Injection Laser

이는 diode laser라고도 부르며 injection이란 말을 붙인 것은 레이저輻射가 일어나게 하기 爲해서 pn junction 넘어로 電子를 投入시키기 때문이다. 여기서는 이 레이저의 한 例로서 GaAs, (gallium arsenide) diode 레이저에 對하여 說明하기로 한다.

다음 그림에 表示되어 있는 junction은 順方向으로 편기되고 있고 따라서 이 junction을 넘어가는 電子는 에너지를 갖고 있어 이 電子가 hole와 結合하면 이 에너지中의 一部를 光子의 形態로 放出한다. 이와 같이 電流의 影響에 의하여 빛을 放射하는 材料를 electroluminescent 하다고 한다. 萬一 이때 이 半導體中을 흐르는 電流의 크기가 많으면 多量의 電子와 hole가 junction의 p쪽에 集中하게 되고 이곳이 바로 電子가 이 隔壁을 넘어선 곳이며 이곳을 作用領域이라고 부른다. 이곳에서 多量의 電子와 陽孔이 再結合을 일으킴으로 多量의 光子가 放射된다. 그러면 루비 레이저의 경우와 마찬가지로



pn junction

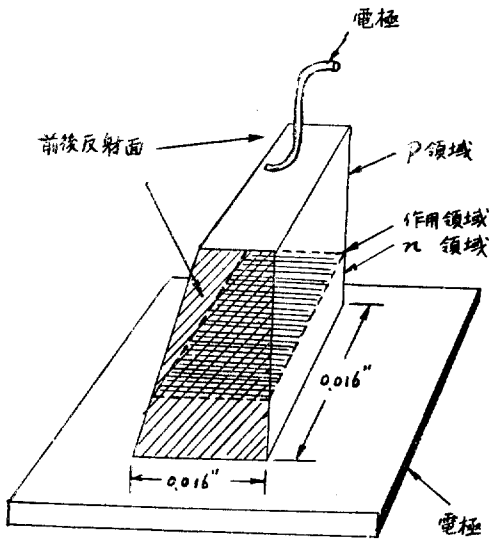


Diode 레이저 作用

지므로 이 作用이 일어나는 처음 時期에는 몇개의 光子가 放射되고 이 光子는 이 半導體中을 往復하는 사이에 나머지 投入된 電子와 陽孔에 衝動을 주어 再結合을 促進시켜 더 많은 光子의 放射를 가져오게 한다. 이와 같이 해서 나온 光子는 衝動한 光子와 位相이 같고 따라서 코히런트한 빛을 얻게 된다.

다음 그림은 레이저 diode의 代表的인 例인데 이의 한가지 특징은 그 크기가 다른 레이저에 比하여 매우 적은 것이다. 그 側面 길이가 0.016"이고 作用領域의 幅은 불과 0.0001"에 지나지 않는다. 다른 結晶體와 마찬가지로 이 GaAs도 cleavage plane을 갖고 있으므로 이 面에 따라 結晶體를 쪼개면 平行面을 얻을 수 있고 이 兩面을 닦아서 反射面이 되게 하여 이 속에 레이저束을 감우어 두어 이 레이저束이 充分한 세기를 가진 다음 放出되게 한다.

이 diode 레이저는 junction 넘어로 電子를 投入시키는 電流에 의하여 勵起되기 때문에 매우 높은 電流密度가 所要되고 그 크기는 1平方cm 당 10,000~20,000amp 程度이다. 따라서 이와 같은 電流에 의하여 熱이 많이 發生하게 됨으로 이와 같은 레이저는 繼續적으로 使用되지 못하고 pulse로 使用된다. 勿論 100 amp 程度의 레이저는 連續적으로 使用할 수 있다. 後者인 경우 그 크기가 작고 또 連續적으로 使用할 수 있기 때문에 通



GaAs diode 레이서 圖

信方面的 應用에 매우 큰 期待를 가질 수 있다.

루비 레이저인 경우 臨界펌핑에너지가 있는 것과 마찬가지로 diode 레이저도 어떤 特定된 電流密度 以上이 있어야 하고 이보다 낮은 電流密度에서는 單只 이 diode

는 electroluminescent가 되고 이 때 나오는 빛은 인코herent이다.

Diode 레이저의 다른 利點은 그 效率이 매우 좋고 室溫에서도 매우 좋은 效率로 動作시킬 수 있을 뿐만 아니라 값도 싸다는 點이고 또 그 pump 에너지가 電流에 의하여 直接供給됨으로 레이저束을 變調시킬 수 있다는 點이다.

Diode 레이저의 出力은 이 diode의 크기가 적기 때문에 다른 레이저에 比하여 매우 적다. 連續的으로 使用하는 diode 레이저의 出力은 最高 1 watt 程度이고 效率은 10~20程度이다. 이 diode는 加熱을 방지 하기 위해서 77°K로 冷却하나 새로운 半導體技術에 의하여 室溫에서도 使用할 수 있게 되었다. 出力에너지의 周波數는 8400Å이고 이는 conduction band와 valence band 間의 에너지差에 該當하며 또 이 GaAs diode의 不純物量을 變化시켜서 9000Å, 9160Å도 얻을 수 있다.

後 記

以上에서 메이서나 레이저의 作用機構을 中心으로 해서 略述했는데 이 以外에도 또 그 應用面에 對하여 言反해야 하나 이에 對해서는 여러 刊行物에서 綜合的으로 또는 斷片的으로 많이 紹介되어 있기 때문에 여기서는 略하기로 한다.

“끝”

<學會消息 계속>

會 員 動 靜

☆ 李 炳 華 : 韓國 Midtex 電子會社 副社長

(東大門區 踏十里洞 463-11)